

火箭煤油热裂解研究^{*}

张 星, 孙海云, 蒋榕培, 李梦竹, 方 涛

(北京航天试验技术研究所 航天绿色推进剂研究与应用北京市重点实验室, 北京 100074)

摘 要: 为了探究火箭煤油热裂解过程以及抗氧化剂对热裂解过程的影响, 通过火箭煤油静态热裂解实验研究了火箭煤油在683K~713K条件下裂解转化率、裂解产气率、气相产物组成随温度和时间变化规律。同时, 对比了加入1wt%抗氧化剂邻甲基对苯二酚(THQ)的火箭煤油热裂解行为, 发现THQ对火箭煤油热裂解有明显抑制作用。683K~713K下, 火箭煤油添加1wt% THQ前后的裂解活化能分别为150.0kJ/mol和210.5kJ/mol, 并获得了相应的Arrhenius热裂解方程。对比发现我国火箭煤油裂解速率常数小于美国RP-1, RP-2火箭煤油。

关键词: 火箭煤油; 主动冷却; 热裂解; 动力学方程; 抗氧化剂

中图分类号: V511.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055(2020)06-1420-08

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190464

Research on Rocket Kerosene Pyrolysis

ZHANG Xing, SUN Hai-yun, JIANG Rong-pei, LI Meng-zhu, FANG Tao

(Beijing Key Laboratory of Research and Application for Aerospace Green Propellants, Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: In order to investigate the pyrolysis process of rocket kerosene (RK) in China and the effects of antioxidants on the pyrolysis process, the static pyrolysis experiment was conducted to study the law of pyrolysis conversion rate, pyrolysis gas production rate and gas phase product composition of RK with temperature and time under 683K~713K in this work. At the same time, the pyrolysis behavior of RK containing 1wt% antioxidant *o*-methylhydroquinone (THQ) was compared and it was found that THQ had a significant inhibitory effect on the pyrolysis of RK. Under 683K~713K, the pyrolysis activation energies of RK before and after adding 1wt% THQ were 150.0kJ/mol and 210.5kJ/mol, respectively, and the corresponding Arrhenius pyrolysis equations were obtained. By comparison, it was found that the pyrolysis rate constant of RK is smaller than those of American RP-1 and RP-2 rocket kerosene.

Key words: Rocket kerosene; Active cooling; Pyrolysis; Kinetics equation; Antioxidant

1 引 言

在新一代运载火箭主动力系统中, 液氧煤油火箭发动机具有推力大、煤油燃料常温可贮存、推进剂绿色环保等突出的优点, 是未来重型运载火箭动力

系统的主要发展方向之一。在发动机设计和使用过程中, 煤油需要作为冷却介质参与火箭发动机的热管理, 在发动机冷却通道流动过程中进行热量交换, 避免局部热流密度过大, 降低推力室表面温度^[1]。火箭煤油中包含链烷烃、环烷烃、芳香烃等多种烃类化

^{*} 收稿日期: 2019-07-04; 修订日期: 2019-09-16。

基金项目: 中国航天科技集团公司钱学森青年创新基金。

作者简介: 张 星, 硕士, 工程师, 研究领域为液体推进剂。E-mail: zxx03@163.com

通讯作者: 方 涛, 博士, 研究员, 研究领域为液体推进剂。E-mail: casc101tj@sina.com

引用格式: 张 星, 孙海云, 蒋榕培, 等. 火箭煤油热裂解研究[J]. 推进技术, 2020, 41(6): 1420-1427. (ZHANG Xing, SUN Hai-yun, JIANG Rong-pei, et al. Research on Rocket Kerosene Pyrolysis[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(6): 1420-1427.)

合物,温度过高超过其组分的裂解温度时,容易发生裂解反应,同时可能形成碳沉积,降低发动机的传热效果,造成发动机冷却失效。常用的烃类燃料中,通常人为加入少量添加剂,包括抗氧化剂、结焦抑制剂、抗爆剂、热稳定剂等,这些添加剂主要是保证燃料在储存、运输和使用过程中不变质、延缓氧化、提高热稳定性等。添加剂在航空煤油燃料的使用中已经非常普遍。国外已经率先开始研究添加剂(主要是抗氧化剂)对于火箭煤油使用性能的影响,尤其是对火箭煤油裂解行为的影响^[2]。深入研究火箭煤油的热裂解行为对于液氧煤油发动机热管理设计和使用具有重要意义。

火箭煤油的热裂解反应动力学研究有利于了解火箭煤油在液氧煤油发动机实际工况下的裂解程度,评价其热稳定性。火箭煤油组分复杂,不同国家的火箭煤油组分具有较大的差异性。美国和俄罗斯在液氧煤油动力系统研制方面起步较早,对火箭煤油的热裂解行为有较深的研究基础。以斯坦福大学^[3-4]和美国国家标准与技术研究院^[1-2]为代表的机构分别对RP-1煤油和RP-2煤油的热裂解行为和裂解动力学进行了研究,得到了RP-1煤油和RP-2煤油的裂解速率常数、裂解动力学方程,添加剂对裂解行为的影响等。国内的学者对烃类燃料裂解行为的研究主要集中在正庚烷^[5]、JP-10^[6]、航空煤油^[7]、正十二烷^[8-9]等物质,而对我国现役火箭煤油裂解行为研究以及添加剂对裂解行为影响等相关的研究鲜有报道。

根据文献资料,烃类燃料温度高于673K时会发生热裂解^[10-11]。为了了解和对比火箭煤油本质裂解行为以及添加剂对火箭煤油裂解的影响,本文采用静态高温裂解手段,选择683K~713K温度条件下,研究我国现役火箭煤油(简称“火箭煤油”或“RK”)在静态恒容裂解装置中不同温度下的裂解转化率、产气率、主要裂解产物随裂解时间的变化情况,建立火箭煤油裂解动力学方程,获得裂解速率和活化能参数,掌握火箭煤油裂解规律。对比抗氧化剂邻甲基对苯二酚(THQ)对火箭煤油裂解行为的影响。最后,基于此研究数据和国外文献中的报道结果对比我国火箭煤油与美国RP-1,RP-2这两种典型火箭煤油的裂解反应速率差异,为我国大推力液氧煤油发动机安全传热和冷却设计提供数据基础。

2 方法

2.1 实验原料

我国现役火箭煤油来自中石油克拉玛依石化分

公司。不同批次火箭煤油组成略有差别。主要组成见表1。

Table 1 Hydrocarbon composition of RK

Composition	Content/%
Paraffin	20.4
Monocyclic hydrocarbon	26.4
Bicyclic hydrocarbon	47.4
Tricyclic hydrocarbon	2.2
Alkyl benzene	3.6

邻甲基对苯二酚(又名甲基氢醌,缩写为THQ,抗氧化剂),纯度99%,采购自百灵威试剂有限公司。在工业应用和实验研究中,火箭煤油中抗氧化剂的添加量一般在0.003wt%~2.0wt%左右,有的研究工作中,会将抗氧化剂的添加量最高达到5.0wt%^[2,12-13]。本研究中,THQ的添加量确定为火箭煤油质量的1%。

2.2 仪器与设备

本实验采用静态裂解装置如图1所示,FCZ 100mL不锈钢高压反应釜,大连科茂实验设备有限公司;AL-508P控温仪,厦门宇电自动化有限公司;XS105DU电子天平,梅特勒-托利多仪器有限公司;GC-9790气相色谱,浙江福立分析仪器有限公司;7890/5975C气质联用仪,安捷伦仪器有限公司。

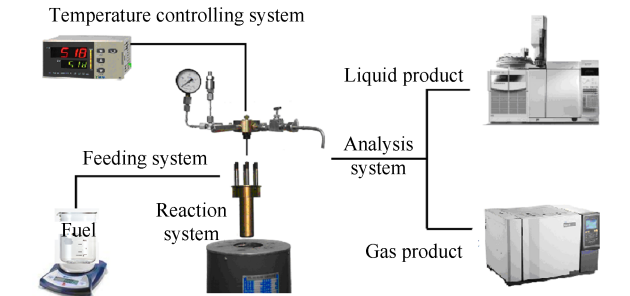


Fig. 1 Rocket kerosene static cracking experimental system

2.3 实验过程与条件

将25g的RK样品加入反应釜内,然后通过针型阀通入高压N₂置换釜内的空气3次,每次10min,保证釜内无空气存在。打开控温装置,设定裂解实验的升温程序,待裂解反应到预定时间后,立即将反应釜取出并冷却。装置冷却后,气体产物通过针型阀排出并收集,用气相色谱进行分析;当反应釜内的压力降至常压,打开反应釜,取出液体残余物并称量,用气质联用仪进行分析。

碳氢化合物气体的分析条件:色谱柱采用 30m PLOT(KB-Al₂O₃ / Na₂SO₄)毛细管分离柱;检测器采用氢火焰检测器(FID),进样口温度 150℃;检测器温度为 180℃;升温条件:初温 50℃,保持 3min,之后以 5℃/min 的升温速率升至 160℃,并保持 10min;载气为氮气 0.5MPa。

氢气的分析条件:色谱柱采用 10m TDX-01 不锈钢分离柱;检测器采用热导检测器(TCD),100℃;温度条件为进样口 100℃,柱箱 90℃;载气为氮气 0.5MPa。

液体产物分析条件:采用 HP-5MS (30m×0.25mm×0.25μm)毛细管柱;升温条件为初温 50℃,保持 2min,以 10℃/min 速率升至 260℃,保持 2min,进样口温度 250℃,检测器温度 280℃;载气为高纯氮气,流速为 1.0mL/min,400:1 分流比进样,进样量为 0.1μL。

质谱离子源为 EI 源,电子能量 70eV,离子源温度 230℃,四级杆温度 150℃,扫描范围为 35amu~350amu。

2.4 数据处理方法

(1) 裂解转化率计算

裂解转化率 x 是衡量裂解反应发生程度的关键参数,即

$$x = \frac{m_0 - m_1 c}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中 m_0 为裂解前加入火箭煤油的质量, g; m_1 为裂解后釜内液体的质量, g; c 为在釜内液体中未发生裂解火箭煤油的质量分数,通过气相色谱仪检测并按面积归一化法计算获得。

(2) 裂解产气率计算

裂解产气率 η 是衡量裂解过程中产生气体裂解产物量的关键参数,即

$$\eta = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

(3) 裂解反应动力学计算

火箭煤油中包含近 200 种烃类化合物组分,每一种组分在不同的条件下有着不同的裂解路径,并且一个裂解反应可能产生不止一种化合物。添加剂的加入对于裂解路径的影响也较为显著。因此,为了深刻理解燃料的整体裂解行为,参考烃类燃料的裂解研究的习惯做法,进行以下两个假设:(1)火箭煤油整体裂解动力学按一级反应处理^[14]。(2)裂解产物仅包括裂解气相产物和裂解液相产物^[15-16]。

火箭煤油反应速率常数 k' 的计算公式为

$$k' = \frac{1}{t} \ln \frac{1}{1-x} \quad (3)$$

式中 t 为反应时间, h; k' 的单位为 h⁻¹。

裂解反应过程 Arrhenius 方程式为

$$k = A \exp(-E_a / (RT)) \quad (4)$$

式中 k 为速率常数, h⁻¹; A 为指前因子, h⁻¹; E_a 为活化能, kJ/mol; R 为气体常数 (8.314 J/(mol·K)); T 为反应温度, K。可通过此关系式推导出 E_a 和 A 的值。

3 结果与讨论

3.1 裂解转化率研究

图 2 为未添加抗氧化剂的火箭煤油和添加有 1wt% THQ 抗氧化剂的火箭煤油的裂解转化率随温度和裂解时间的变化曲线。对比不同温度下火箭煤油的裂解转化率曲线,可以看出,在 683K~713K 下,随着温度的升高和裂解时间的延长,火箭煤油裂解转化率明显增加。当裂解持续 4h 后,683K 下火箭煤油裂解转化率为 17.84%,同样裂解时间下,713K 时裂解转化率达到 40.6%,是 683K 下火箭煤油裂解转化率的近 2.3 倍,可见温度和裂解时间是影响火箭煤油裂解行为的两个关键因素。火箭煤油的裂解反应为吸热过程,温度升高有利于裂解反应的发生,从而导致裂解转化率增加,这一点在图 2 中也得到印证。对比同一温度和相同的裂解时间下,可以看出添加有抗氧化剂 THQ 的火箭煤油的裂解转化率明显低于未添加 THQ 的火箭煤油。裂解时间为 4h 时,在 683K, 693K, 703K, 713K 下,添加 THQ 的火箭煤油裂解转化率分别为未添加 THQ 的火箭煤油裂解转化率的 50%, 56.1%, 62.3%, 91%。可见加入 THQ 在一定程度上可以抑制或减缓火箭煤油的裂解反应,但是随着裂解温度的提高,THQ 对裂解反应的抑制或减缓程度也在逐渐减小。

图 3 对比了添加 THQ 前后火箭煤油在 683K 下

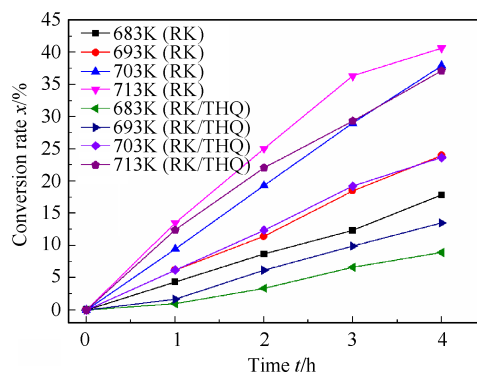


Fig. 2 Pyrolysis conversion rate of RK and RK containing 1wt% THQ with temperature and time

裂解 1h 与未发生裂解反应的火箭煤油的釜残液色谱图。可以看出 683K 下裂解 1h 后,火箭煤油色谱停留时间 1min~5min 出现轻组分裂解产物峰。添加 THQ 后,轻组分裂解产物的含量明显降低。同样印证了 THQ 有抑制或减缓火箭煤油裂解的作用。

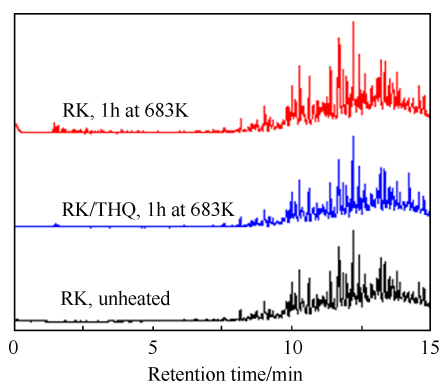


Fig. 3 Residual liquid gas chromatography of RK, RK/THQ and unheated raw material

3.2 裂解产气率研究

火箭煤油裂解产气率随温度、时间变化和添加抗氧化剂 THQ 对产气率的影响规律如图 4 所示。温度越高,裂解时间越长,火箭煤油产气率越高,温度为 713K 时,火箭煤油的产气率显著提升,说明 713K 时,裂解产物中气相小分子裂解产物量明显增加,高温条件有利于小分子裂解产物的生成。添加 THQ 的火箭煤油的产气率明显比没有添加 THQ 的火箭煤油的产气率低,这主要是因为 THQ 使火箭煤油整体裂解转化率降低,气相裂解产物的生成量显著减少。

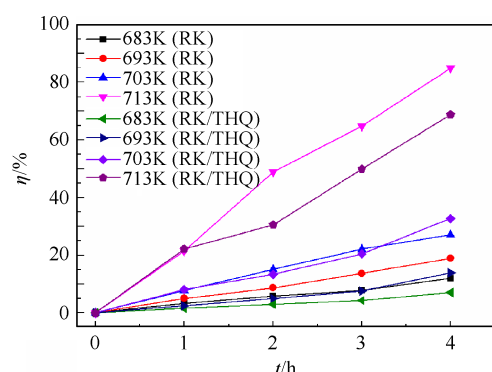


Fig. 4 Gas production rate variation curve of RK and RK with 1wt% THQ with temperature and pyrolysis time

3.3 裂解气相产物组成变化研究

作为一种多种烃类物质构成的燃料,火箭煤油裂解的产物种类较多,包括甲烷、乙烷、乙烯、丙烷、

丙烯、丁烯、氢气、丙二烯等低碳数的烷烃和烯烃^[17-18]。其中甲烷、乙烷、乙烯、丙烷、丙烯等占到气相产物中的绝大部分^[19-20]。烃类燃料的裂解脱氢反应可能产生氢气,氢气量是表征脱氢反应过程的一个参数^[11,21]。因此,这里主要对火箭煤油裂解产生的甲烷、乙烷、乙烯、丙烷、丙烯、氢气等的含量变化情况进行研究。

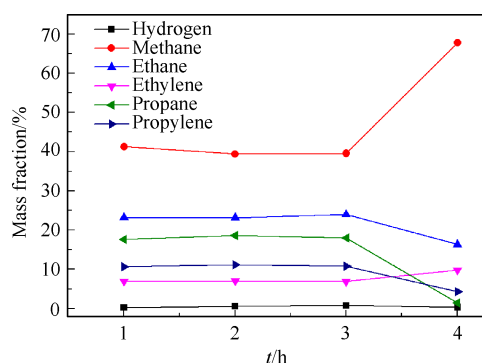
图 5 为 683K~713K 温度下的火箭煤油气相产物组成变化曲线。可以看出,683K~713K 温度下,相比较于其它几种气体产物,氢气的产生量较少,火箭煤油裂解过程中断链反应发生比例明显高于脱氢反应,这也符合热力学规律^[21],这是因为火箭煤油热裂解过程是自由基连锁反应机理,C—H 的解离能(412kJ/mol)大于 C—C 键(348kJ/mol),通常 C—C 键更易断裂^[16,20,22]。断链反应在裂解温度下,C—C 键断裂更容易在分子两端进行,随着烷烃分子量增大,分子中央的 C—C 键也开始逐渐断裂。甲烷是最容易生成的饱和烃,高碳数的不饱和烃的生成量较低^[21]。此外可以看出 683K~693K,裂解反应时间 1h~3h 时,气相中甲烷、乙烷、乙烯、丙烯、丙烷、丙烯含量变化不大,反应时间大于 3h 时,甲烷、乙烯的质量分数显著增多,乙烷、丙烷和丙烯的质量分数显著下降;703K~713K 温度下,裂解反应时间大于 3h 时,甲烷、丙烷的质量分数下降,乙烯的质量分数显著上升。

为了考察抗氧化剂 THQ 对火箭煤油裂解气相产物的影响,研究了 683K~713K 下添加 THQ 的火箭煤油的裂解气相产物(氢气、甲烷、乙烷、乙烯、丙烷、丙烯)随裂解时间的变化,如图 6 所示。683K 条件下,可以看出,裂解时间为 1h~2h 时,甲烷、丙烷、丙烯的含量随着裂解时间的延长而显著增加,乙烷、乙烯的含量则显著降低。时间继续延长时,甲烷、乙烷的含量略下降,乙烯和丙烯的含量则略增加。693K~703K 条件下,各气体组分的含量随时间的变化相对较缓。而当温度升高到 713K 时,可以看到,2h~3h 时,乙烯的含量迅速升高,丙烷的含量迅速下降,同时甲烷的含量也呈现缓慢下降的趋势。可见 THQ 的添加,对改变火箭煤油气相产物的组成变化有直接的影响。

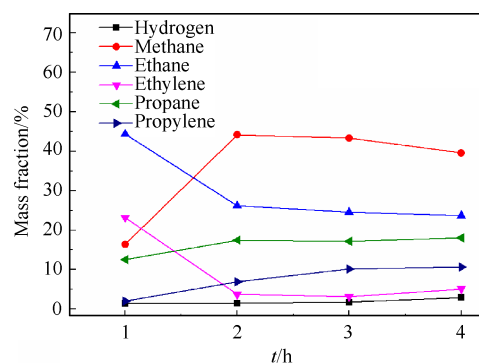
如图 7 所示,在 683K 下,裂解时间为 4h 时,添加 THQ 后火箭煤油裂解产生的氢气、乙烷、丙烷、丙烯分别为未添加 THQ 火箭煤油的 8.6 倍、1.5 倍、12.3 倍、2.5 倍。添加 THQ 后火箭煤油裂解产生的甲烷、乙烷分别为未添加 THQ 火箭煤油的 58.4% 和 51.9%。在

713K下,裂解时间为4h时,添加THQ后火箭煤油裂解产生的氢气、甲烷、乙烷、丙烷分别是未添加THQ火箭煤油的3.8倍、1.05倍、1.04倍、1.02倍,乙烯、丙

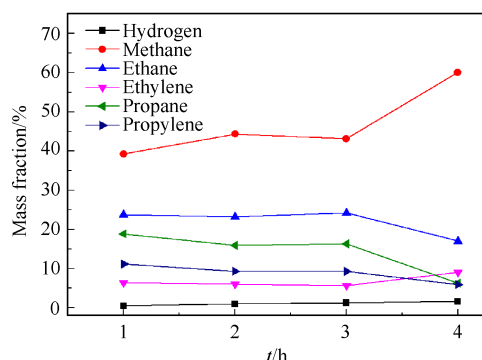
烯分别是未添加THQ火箭煤油的88.0%和70.1%。可见THQ对火箭煤油裂解的脱氢过程有明显促进作用,氢气量明显上升。



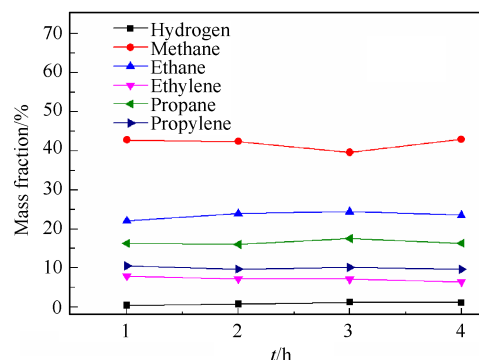
(a) 683K



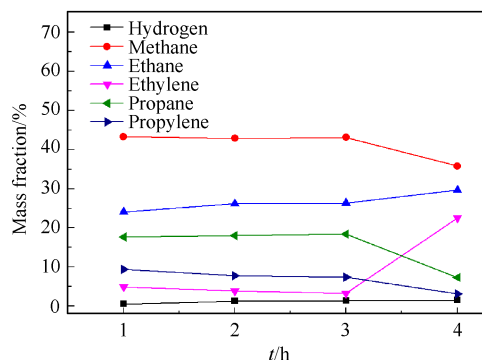
(a) 683K



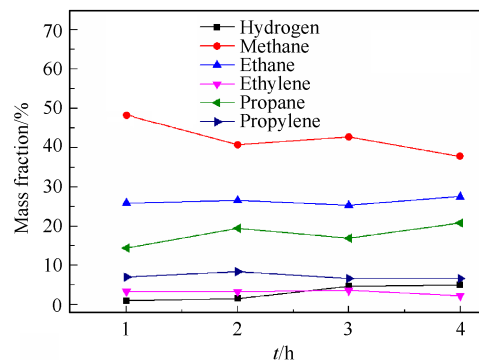
(b) 693K



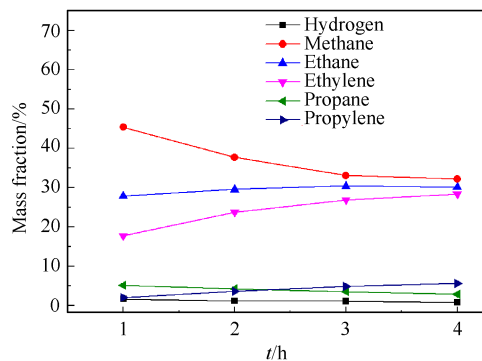
(b) 693K



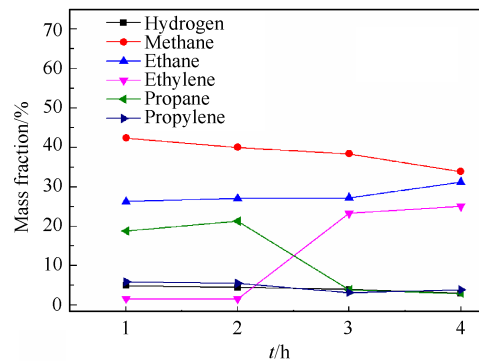
(c) 703K



(c) 703K



(d) 713K



(d) 713K

Fig. 5 Gas phase product composition of RK at different temperatures

Fig. 6 Gas phase product composition of RK with 1wt% THQ at different temperatures

3.4 裂解反应动力学

火箭煤油和添加有 THQ 的火箭煤油在不同温度下裂解反应的一级动力学曲线如图 8 所示。裂解速率常数可以利用公式(3)通过 $\ln[1/(1-x)]$ 与时间的曲线斜率求得,具体得到的动力学参数如表 2 所示。

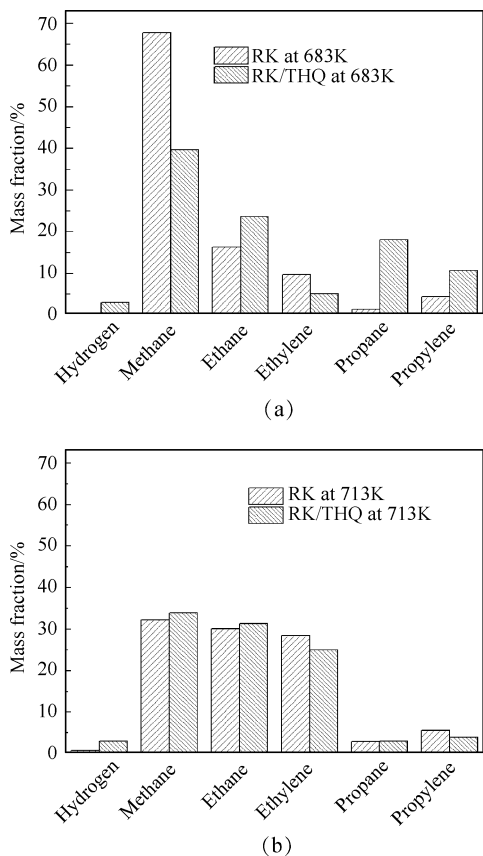


Fig. 7 Gas phase product composition comparison (pyrolysis time=4h)

Table 2 Pyrolysis kinetic parameters of RK with and without 1wt% THQ

T/K	RK		RK/THQ	
	k'/h^{-1}	r^2	k'/h^{-1}	r^2
683	0.04795	0.9897	0.02452	0.9628
693	0.06872	0.9949	0.03836	0.9762
703	0.11932	0.9950	0.06886	0.9967
713	0.14952	0.9985	0.11425	0.9966

火箭煤油中各组分的裂解过程较为复杂。利用 Arrhenius 公式(4),可推算添加 THQ 前后火箭煤油的裂解动力学 Arrhenius 公式中的裂解平均活化能 E_a 和指前因子 A 的值。经过拟合计算,得到火箭煤油的活化能 E_a 为 150.0kJ/mol。火箭煤油裂解 Arrhenius 方程为 $k=1.51\times10^{10}\exp(-150029/(RT)) (h^{-1})$, 即 $k=4.2\times10^6\exp(-1.08\times10^4/T(K))(s^{-1})$ 。

添加 1wt% THQ 后火箭煤油的活化能 E_a 为 210.5kJ/mol。火箭煤油(含 1wt% THQ)裂解 Arrhenius 方程为 $k=3.0\times10^{14}\exp(-150029/(RT))(h^{-1})$, 即 $k=8.3\times10^{10}\exp(-2.53\times10^4/T(K))(s^{-1})$ 。可见添加 THQ 后火箭煤油裂解的平均活化能明显提高,证明了 THQ 对火箭煤油的裂解有抑制作用,THQ 可优先与裂解产生的自由基发生反应,使自由基浓度降低,使火箭煤油自身的自由基链式反应速率降低。

结合文献中对 RP-1,RP-2 裂解速率常数研究数据^[23-24],我国现役火箭煤油与美国 RP-1,RP-2 煤油在不同温度下的裂解速率常数对比如图 9 所示。可见在 683K~713K 内,我国现役火箭煤油的裂解速率

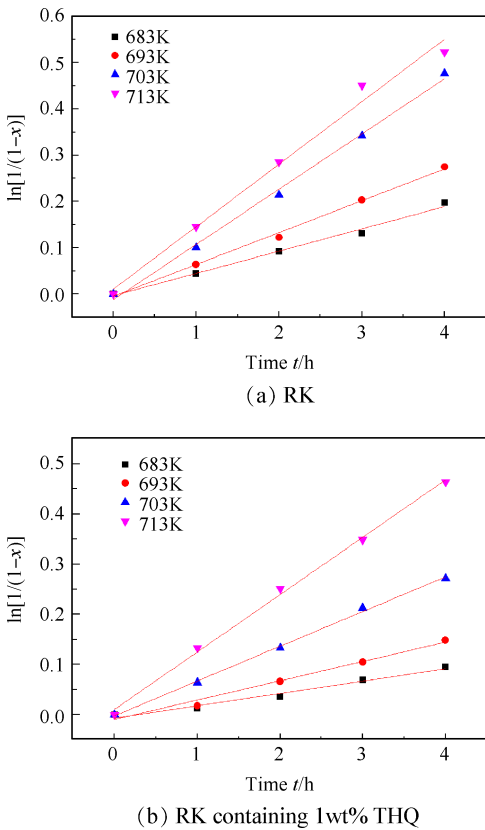


Fig. 8 First-order kinetic curve of thermal cracking

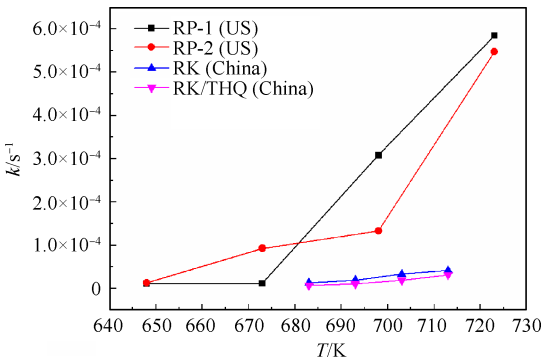


Fig. 9 Pyrolysis rate constants comparison of different rocket kerosene

常数小于 RP-1 和 RP-2。这主要是因为我国现役火箭煤油中环烷烃含量较高,而美国火箭煤油中有较高含量的烯烃和链烷烃,高温下,链烷烃比环烷烃更容易发生裂解。同时,可看出 683K~713K 条件下,THQ 能显著减小火箭煤油的裂解速率常数,抑制或减缓裂解反应。

4 结 论

本文对 683K~713K 下火箭煤油的热裂解行为(裂解转化率、裂解产气率、裂解气相组成变化、裂解动力学)进行了研究,得到以下结论:

(1)随着裂解温度的升高和裂解反应时间的延长,火箭煤油的裂解转化率和产气率均显著增大,抗氧化剂 THQ 有明显抑制或降低火箭煤油裂解程度的作用。

(2)火箭煤油裂解气相产物中氢气的含量较低,甲烷、乙烷、乙烯、丙烷和丙烯的含量较高。683K~693K,甲烷、乙烯的含量显著增多;703K~713K,甲烷、丙烷的质量分数显著下降,乙烯的质量分数显著上升。THQ 的添加,对改变火箭煤油气相产物的组成变化有直接的影响。

(3)火箭煤油的热裂解符合一级动力学关系。火箭煤油添加 1wt% THQ 前后的 Arrhenius 热裂解方程分别为 $k=4.2\times 10^6\exp(-1.08\times 10^4/T(K))(s^{-1})$ 和 $k=8.3\times 10^{10}\exp(-2.53\times 10^4/T(K))(s^{-1})$,裂解活化能分别为 150.0kJ/mol 和 210.5kJ/mol,添加 THQ 后火箭煤油裂解活化能明显提高。在 683K~713K 内,我国现役火箭煤油的裂解速率常数小于美国 RP-1 和 RP-2 煤油。

本研究对我国液氧煤油发动机冷却设计具有重要意义。后续课题组将对火箭煤油的详细裂解机理、产物全分布、动态裂解动力学等开展进一步研究,以便更加深入地了解火箭煤油裂解过程。

致 谢:感谢中国航天科技集团公司钱学森青年创新基金的资助。

参考文献

- [1] Andersen P C, Bruno T J. Thermal Decomposition Kinetics of RP-1 Rocket Propellant[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005, 44(6): 1670-1676.
- [2] Widegren J A, Bruno T J. Thermal Decomposition Kinetics of Kerosene-Based Rocket Propellants. 2. RP-2 with Three Additives[J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(11): 5523-5528.
- [3] MacDonald M E, Davidson D, Hanson R K. Decomposition Measurements of RP-1, RP-2, JP-7, *n*-Dodecane, and Tetrahydroquinoline in Shock Tubes[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2011, 27(5): 981-989.
- [4] MacDonald M E. Decomposition kinetics of the Rocket Propellant RP-1 and Its Chemical Kinetic Surrogates [D]. *United States: Stanford University*, 2012.
- [5] 李 军, 邵菊香, 刘存喜, 等. 碳氢燃料热裂解机理及化学动力学模拟[J]. *化学学报*, 2010, 68(3): 239-245.
- [6] 蔡尚立. 高密度吸热型碳氢燃料裂解与燃烧特性研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2008.
- [7] 赵国柱, 宋文艳, 张若凌. 超临界态碳氢燃料流固耦合传热及热裂解的计算方法研究[J]. *推进技术*, 2014, 35(12): 1639-1644. (ZHAO Guo-zhu, SONG Wen-yan, ZHANG Ruo-ling. Numerical Method Development for Conjugated Heat Transfer of Hydrocarbon Fuel with Thermal Cracking at Supercritical Conditions [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(12): 1639-1644.)
- [8] 华晓筱, 王静波, 王全德, 等. 正十二烷高温燃烧机理的构建及模拟[J]. *物理化学学报*, 2011, 27(12): 2755-2761.
- [9] 方亚梅, 王全德, 王 繁, 等. 正十二烷高温燃烧详细化学动力学机理的系统简化[J]. *物理化学学报*, 2012, 28(11): 2536-2542.
- [10] Edwards T. Liquid Fuels and Propellants for Aerospace Propulsion[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2003, 19(6): 1089-1107.
- [11] Fry R S. A Century of Ramjet Propulsion Technology Evolution[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2004, 20(1): 27-58.
- [12] 杰尼索夫 ET, 柯瓦列夫 Г И. 喷气燃料的氧化及其抑制 [M]. 北京: 烃加工出版社, 1987.
- [13] Bauldreay J M, Nair V, Roes A W M, et al. Kerosene Base Fuel[P]. *US*: 2011/0005190 A1, 2011-01-13.
- [14] Dagaut P, Cathonnet M. The Ignition, Oxidation, and Combustion of Kerosene: A Review of Experimental and Kinetic Modeling[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2006, 32(1): 48-92.
- [15] Widegren J A, Bruno T J. Thermal Decomposition Kinetics of the Aviation Turbine Fuel Jet A [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008, 47(13): 4342-4348.
- [16] Widegren J A, Bruno T J. Thermal Decomposition Kinetics of Kerosene-Based Rocket Propellants. 1. Comparison of RP-1 and RP-2[J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(1): 5517-5522.

- [17] Widegren J A, Bruno T J. Thermal Decomposition Kinetics of Propylcyclohexane [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, 48(2): 654–659.
- [18] Xing Y, Xie W, Fang W, et al. Kinetics and Product Distributions for Thermal Cracking of a Kerosene-Based Aviation Fuel [J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(8): 4021–4024.
- [19] Hou L, Dong N, Sun D. Heat Transfer and Thermal Cracking Behavior of Hydrocarbon Fuel [J]. *Fuel*, 2013, 103(1): 1132–1137.
- [20] Gough R V, Widegren J A, Bruno T J. Thermal Decomposition Kinetics of the Thermally Stable Jet Fuels JP-7, JP-TS and JP-900 [J]. *Energy & Fuels*, 2014, 28(5): 3036–3042.
- [21] 秦笑梅. 高密度吸热型碳氢燃料的热稳定性[D]. 杭州:浙江大学, 2015.
- [22] 邹任望. 石油化工裂解原理与技术(第一版)[M]. 北京:化学工业出版社, 1981.
- [23] MacDonald M, Davidson D, Hanson R. Decomposition Rate Measurements of RP-1, RP-2, *n*-Dodecane, and RP-1 with Fuel Stabilizers [C]. *Connecticut: 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2008.
- [24] Bruno T J. The Properties, Reactivity and Variability of RP-1 and RP-2. NIST [C]. *US: Powerpoint Slides for Meeting*, 2009.

(编辑:梅 瑛)